

**A.R. Ghanizadeh\***

Department of Civil  
Engineering, Sirjan University  
of Technology, Sirjan.

**e-mail:** ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

**N. Heidarabadizadeh**

Advanced Bitumen and  
Asphalt Mixes Laboratory,  
Sirjan University of  
Technology, Sirjan.

**e-mail:** n.heidarabadi1992@gmail.com

**S. Dadkani**

Department of Civil  
Engineering, Sirjan University  
of Technology, Sirjan.

**e-mail:** saeeddadkani@gmail.com

## **Modeling of Resilient Modulus of Korta Reinforced Asphalt Mixtures Using Response Surface Methodology (RSM)**

*In this paper, two models have been developed to predict the resilient modulus of asphalt mixtures reinforced with Korta fiber subjected to square and haversine waveform, based on the response surface methodology. To this end, the asphalt mix samples were fabricated with three different percentages of bitumen and four different percentages of Korta fiber and then the resilient modulus was measured at five temperatures, five loading frequencies and two loading waveforms (squared and haversine), using UTM 30 apparatus. In this study, temperature, loading time, bitumen percentage and fiber percentage were considered as inputs variables and the resilient modulus under haversine and square loading waveforms was considered as output variable. The results of this study show that the response surface methodology is able to predict the resilient modulus of fiber reinforced asphalt samples with high accuracy, so that the regression coefficient of the developed equations for the haversine and square loading waveforms is 0.9795 and 0.9777, respectively. Also, the results of sensitivity analysis show that increasing fiber percentage to a certain amount increases the resilience modulus and increasing the fiber content to more than this percentage, decreases the resilient modulus. This study also shows that the optimum percentage of Korta fiber depends on the bitumen content in the asphalt mix. So that in asphalt mixtures with higher bitumen percentages, the optimum fiber percentage was less (about 1 kg/ton) and in mixtures with lower bitumen percentage, the optimum fiber percentage was higher (about 1.5 kg/ton).*

**Keywords:** Resilient Modulus, Korta Fiber, Response Surface Methodology, Loading Waveform, Asphalt Mixes.

---

\* Corresponding author

Received 25 January 2020, Revised 16 April 2020, Accepted 22 April 2020.

DOI: 10.22091/cer.2020.2289.1192

## علیرضا غنی‌زاده\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه  
صنعتی سیرجان.  
پست الکترونیک:  
ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

## نسرین حیدرآبادی‌زاده

دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه صنعتی سیرجان.  
پست الکترونیک:  
heidarabadizadeh@gmail.com

## سعید دادکانی

دانشکده مهندسی عمران،  
دانشگاه صنعتی سیرجان.  
پست الکترونیک:  
saeeddadkani@gmail.com

# مدل‌سازی مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی مسلح شده با الیاف کورتا با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)

در این مقاله، دو مدل به‌منظور پیش‌بینی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف کورتا تحت اثر بارگذاری مربعی و نیم‌سینوسی براساس روش سطح پاسخ، توسعه داده شده است. برای این منظور، نمونه‌های مخلوط آسفالتی با سه درصد مختلف قیر و چهار درصد مختلف الیاف نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شدند و سپس در پنج دما، پنج فرکانس بارگذاری و دو شکل بارگذاری مربعی و نیم‌سینوسی، مدول برجهندگی با استفاده از دستگاه UTM 30 اندازه‌گیری شد. در مدل‌های توسعه داده شده، دما، زمان بارگذاری، درصد قیر و درصد الیاف به‌عنوان متغیرهای ورودی و مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی به‌عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش سطح پاسخ، قادر به پیش‌بینی مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف با دقت بالا است، به‌گونه‌ای که ضریب رگرسیون مربوط به معادلات توسعه داده شده برای دو شکل موج بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی به‌ترتیب برابر ۰/۹۷۹۵ و ۰/۹۷۷۷ به دست آمد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که افزایش درصد الیاف تا مقدار مشخصی باعث افزایش مدول برجهندگی می‌شود و پس از آن با افزایش درصد الیاف، مقدار مدول برجهندگی کاهش می‌یابد. نتایج این تحقیق همچنین نشان داد که درصد بهینه الیاف تابعی از درصد قیر در مخلوط آسفالتی است؛ به‌گونه‌ای که در مخلوط‌های آسفالتی با درصد قیر بیشتر، درصد الیاف بهینه کمتر (حدود ۱ کیلوگرم در هر تن) و در مخلوط‌های با درصد قیر کمتر، درصد الیاف بهینه بیشتر (حدود ۱/۵ کیلوگرم در هر تن) است.

**واژگان کلیدی:** مدول برجهندگی، الیاف کورتا، روش سطح پاسخ، شکل موج، مخلوط آسفالتی.

## ۱- مقدمه

از قیر معمولی و مصالح سنگدانه‌ای تحت شرایط خاص ترافیکی و جوی مانند آمدوشد زیاد، دمای بالا، رطوبت، نیروهای برشی زیاد و از این دست، دارای دوام و مقاومت کافی نیست. تاکنون افزودنی‌های زیادی برای اصلاح خواص مخلوط‌های آسفالتی و افزایش دوام آن‌ها پیشنهاد شده است [۱-۶]. یکی از این افزودنی‌ها، الیاف است که به‌عنوان مسلح کننده در مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود. انواع مختلفی از الیاف برای این منظور استفاده می‌شود که به دو دسته الیاف مصنوعی (شیشه، کربن، پلیمر) و الیاف طبیعی (کنف، لیف نارگیل، کنف هندی،

مخلوط‌های آسفالتی با گذشت زمان و تحت تأثیر ترافیک و دما دچار خرابی‌های متعددی از جمله تغییر شکل ماندگار و ترک‌های خستگی می‌شوند. آسفالت ساخته شده

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۵، بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۳.  
(DOI): 10.22091/cer.2020.2289.1192 شناسه دیجیتال

سیزال، کتان) تقسیم می‌شوند [۷]. استفاده از الیاف، سبب افزایش مقاومت کششی، عمر خستگی و شکست مخلوط‌های آسفالتی می‌شود [۸-۱۳].

مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف، نسبت به تغییر شکل دائمی مقاوم‌تر بوده و مقاومت کششی بالاتری دارند [۱۴]. مسلح سازی مخلوط‌های آسفالتی با الیاف، سبب افزایش مقاومت در برابر رطوبت، ذوب و یخ‌زدان و جذب انرژی بیشتر شده و به‌همین دلیل، ترک‌های انعکاسی در آسفالت کاهش می‌یابد [۱۵-۱۷].

نخستین استفاده گسترده از الیاف در مخلوط‌های آسفالتی گرم به اواخر دهه ۱۹۵۰ برمی‌گردد. در آن زمان گروه مهندسان ارتش آمریکا، انستیتو آسفالت و شرکت جونز مانویل<sup>۱</sup>، اولین ارزیابی را بر روی استفاده از الیاف آزیست در مخلوط‌های آسفالتی گرم انجام دادند. این بررسی نشان داد که مخلوط‌های حاوی الیاف آزیست، مقاومت کششی، مقاومت فشاری، استقامت و دوام بیشتری دارند [۱۸].

نوروند و همکاران، تأثیر الیاف مصنوعی بر عملکرد مکانیکی بتن آسفالتی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که الیاف آرامید باعث افزایش عدد جریان می‌شوند [۱۹]. کالوش<sup>۲</sup> و همکاران، عملکرد مخلوط آسفالتی مسلح شده با درصد‌های مختلف الیاف پلی‌الفین-آرامید فورتا بررسی کردند. آزمایش تغییر شکل ماندگار در دمای ۱۳۰ درجه فارنهایت و با شکل بارگذاری نیم‌سینوسی انجام شد. نتایج آزمایش تغییر شکل ماندگار نشان داد که عدد جریان برای مخلوط اصلاح‌شده با ۱ و ۲ پوند الیاف در هر تن به ترتیب ۱۱۵ و ۲۰ برابر بیشتر از نمونه اصلاح‌نشده است. همچنین شیب منحنی مرحله دوم نمودار تغییر شکل ماندگار با افزایش الیاف کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی است. علاوه بر این بیشترین مدول دینامیک در

دماهای مختلف برای مخلوط مسلح شده با ۱ پوند الیاف در هر تن به‌دست آمد [۲۰].

در سال ۲۰۱۶، فضایی و همکاران، عملکرد مخلوط آسفالت ولرم متشکل از ساسوبیت و الیاف پلی‌الفین-آرامید فورتا را در لایه روکش بررسی کردند. درصد الیاف، ۰/۵ کیلوگرم در تن و درصد ساسوبیت، ۲ درصد وزنی قیر در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که تغییر شکل ماندگار در دمای بالا به میزان ۲ تا ۴ برابر نمونه اصلاح‌نشده و عمق شیارشدگی ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین آزمایش مدول برجهندگی در دمای ۲۵ درجه و با بارگذاری نیمه‌سینوسی انجام شد که نشان‌دهنده افزایش ۴۷ درصدی مدول برجهندگی نمونه مسلح شده با الیاف در مقایسه با نمونه اصلاح‌نشده بود [۲۱]. میرعبدالعظیمی و شفا بخش، عمق شیارشدگی مخلوط آسفالتی مسلح شده با الیاف کورتا را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و تکنیک برنامه‌نویسی ژنتیک پیش‌بینی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که شبکه عصبی مصنوعی پیشنهادی توانایی مناسبی در پیش‌بینی عمق شیارشدگی دارد [۲۲]. جاسکولا<sup>۳</sup> و همکاران، خواص مربوط به ترک‌خوردگی در دمای پایین و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها از الیاف پلی‌آلفین و آرامید فورتا به‌عنوان مسلح‌کننده استفاده کردند. حساسیت به ترک‌خوردگی در دمای پایین با نتایج به‌دست آمده از آزمایش خمش تیرهای مستطیل با نرخ تغییر شکل ثابت و تست خمش نیم‌دایره‌ای براساس تئوری مکانیک شکست ارزیابی شد. عملکرد در دماهای بالا توسط منحنی‌های مرجع مدول دینامیکی بررسی شد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که الیاف ارزیابی شده می‌توانند عملکرد آسفالت در دمای پایین را بهبود دهند [۲۳].

آندروود<sup>۴</sup> و همکاران، کاهش ضخامت روسازی

<sup>3</sup>- Jaskuła

<sup>4</sup>- Underwood

<sup>1</sup>- Johns-Manville

<sup>2</sup>- Kaloush

مدول برجهندگی به‌جای مدول دینامیکی برای آنالیز و طراحی سازه روسازی استفاده شود [۲۶].

مدول برجهندگی در آزمایشات آزمایشگاهی معمولاً به‌وسیله اعمال یک بار با شکل موج نیم‌سینوسی با زمان بارگذاری  $0/1$  ثانیه و زمان استراحت  $0/9$  ثانیه اندازه‌گیری می‌شود [۲۷ و ۲۸]. این شرایط لزوماً شرایط واقع‌بینانه را شبیه‌سازی نمی‌کنند. به‌عنوان مثال، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که شکل و مدت زمان بارگذاری در یک لایه آسفالت با توجه به سرعت خودرو، ضخامت لایه آسفالت، عمق و نسبت مدول لایه آسفالت به مدول لایه اساس متفاوت است [۲۹]. بنابراین هدف اصلی این تحقیق، توسعه مدلی به‌منظور پیش‌بینی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف کورتا تحت اثر بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی است.

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد همان‌طور که در تمامی تحقیقات گذشته صرفاً نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های مسلح شده با الیاف با نمونه شاهد مقایسه شده و هیچ‌گونه مدل‌سازی به‌منظور پیش‌بینی مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف کورتا در دماها و فرکانس‌های بارگذاری مختلف صورت نگرفته است. علاوه بر این، در تمامی تحقیقات گذشته صرفاً از شکل موج نیم‌سینوسی به‌منظور اندازه‌گیری مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی مسلح شده با الیاف استفاده شده است و به بررسی نتایج با شکل موج مربعی پرداخته نشده است.

روش‌های مختلفی به‌منظور مدل‌سازی یک پارامتر خروجی وابسته براساس تعدادی پارامترهای ورودی مستقل وجود دارد که از جمله این روش‌ها می‌توان به رگرسیون خطی و غیرخطی و همچنین روش‌های مبتنی بر هوش محاسباتی مانند روش شبکه عصبی مصنوعی اشاره نمود. عیب اصلی روش رگرسیون خطی، عدم دقت بالا در مدل‌سازی و عیب اصلی روش رگرسیون غیرخطی پیچیده بودن یافتن رابطه غیرخطی و عدم وجود یک

آسفالتی مسلح شده با الیاف کورتا را در کشور پرو ارزیابی نمودند. برای انجام این مطالعه، طراحی روسازی به روش مکانیستیک-تجربی ( $MEPDG^5$ ) برای پیش‌بینی عملکرد روسازی به‌کار گرفته شد. ارزیابی مقایسه‌ای برای روسازی‌های متعارف و روسازی تقویت‌شده با الیاف انجام گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که روسازی آسفالتی مسلح شده با الیاف با ضخامت کمتری در مقایسه با روسازی بدون الیاف می‌تواند عملکرد شیارشدگی یکسانی داشته باشد. همچنین ملاحظه گردید که عمر شیارشدگی روسازی مسلح شده با الیاف در مقایسه با روسازی مسلح نشده برای اقلیم گرم‌تر و خاک بستر مقاوم‌تر، افزایش بیشتری می‌یابد [۲۴].

آزمایش مدول برجهندگی برخلاف آزمایش مدول دینامیکی بین هر دو زمان بارگذاری، یک زمان استراحت در نظر می‌گیرد و به‌همین دلیل با واقعیت بارگذاری مخلوط‌های آسفالتی بیشتر انطباق دارد. همچنین در آزمایش مدول دینامیکی، شکل موج بارگذاری، تنها به‌صورت سینوسی در نظر گرفته می‌شود، در حالی‌که تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که شکل موج بارگذاری در نزدیکی سطح آسفالت به‌صورت مربعی است و با افزایش عمق، شکل موج بارگذاری رفته‌رفته به شکل نیم‌سینوسی نزدیک می‌شود. عدم در نظر گرفتن زمان استراحت و همچنین شکل موج سینوسی در تعیین مدول دینامیکی سبب می‌شود تا مدول دینامیکی همواره بیشتر از مدول برجهندگی برآورد شود و تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که به‌کارگیری مدول دینامیک به‌جای مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی، یک پاسخ بحرانی دست پایین را نتیجه می‌دهد که تأثیر منفی بر پیش‌بینی عمر خستگی و شیارشدگی روسازی دارد [۲۵ و ۲۶]. مطابق با مطالب بالا، تعدادی از محققین پیشنهاد کرده‌اند که

<sup>5</sup>- Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide

روش سیستماتیک برای یافتن شکل مدل است. از طرفی، مدل سازی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی، نیازمند داشتن تعداد داده زیاد جهت آموزش و آزمون مدل خواهد بود که معمولاً در بسیاری از کارهای آزمایشگاهی جمع آوری چنین پایگاه داده ای بسیار وقت گیر و هزینه بر خواهد بود. در تحقیق حاضر، پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی و ساخت نمونه های استوانه ای مارشال حاوی درصد های مختلف قیر و درصد های مختلف الیاف از روش سطح پاسخ به منظور مدل سازی مدول برجهندگی نمونه های مسلح شده با الیاف کورتا تحت اثر بارگذاری نیم سینوسی و مربعی استفاده شده است.

## ۲- مطالعات آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح

به منظور ساخت نمونه های آزمایشگاهی از قیر خالص ۶۰-۷۰ پالایشگاه شیراز استفاده شد. همچنین مصالح سنگی به کار رفته در این پژوهش از نوع سنگ شکسته کوهی معدنی واقع در جاده سیرجان- بندرعباس می باشد. نتایج آزمایش های قیر، مشخصات فیزیکی مصالح سنگی در جداول ۱، ۲ و ۳ آورده شده است. دانه بندی مصالح سنگی نیز مطابق با دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ برای مخلوط های آسفالتی گرم انتخاب شده که نمودار دانه بندی و حدود مجاز آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی قیر

خواص قیر	واحد	استاندارد	حدود مجاز	نتیجه
نفوذ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد	0.1 mm	ASTM D5	۶۰-۷۰	۶۲
نقطه نرمی	°C	ASTM D36	۴۹-۵۶	۵۱
کشش در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد	cm	ASTM D113	۱۰۰>	۱۰۰>
حلالیت در $C_2HCl_3$	%	ASTM D2042	حداقل ۹۹/۵	۹۹/۶
نقطه اشتعال	°C	ASTM D92	حداقل ۲۵۰	۳۲۰
وزن مخصوص	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D70	۱/۰۱-۱/۰۶	۱/۰۰۲
افت وزنی	%	ASTM D1754	حداکثر ۰/۲	۰/۰۹

جدول ۲- خواص فیزیکی مصالح

خواص مصالح	استاندارد	اندازه مصالح	نتیجه
درصد تطویل	BS-812	درشت دانه	۱۴
درصد تورق	BS-812	درشت دانه	۲۴
سایش لس آنجلس	AASHTO T96	درشت دانه	۲۴
شکستگی در یک وجه	ASTM D5821	درشت دانه	۹۵
شکستگی در دو وجه	ASTM D5821	درشت دانه	۹۰
حد خمیری	BS 1377	فیلر	۲۲
حد روانی	ASTM D4318	فیلر	۲۶
شاخص خمیری	ASTM D4318	فیلر	۴

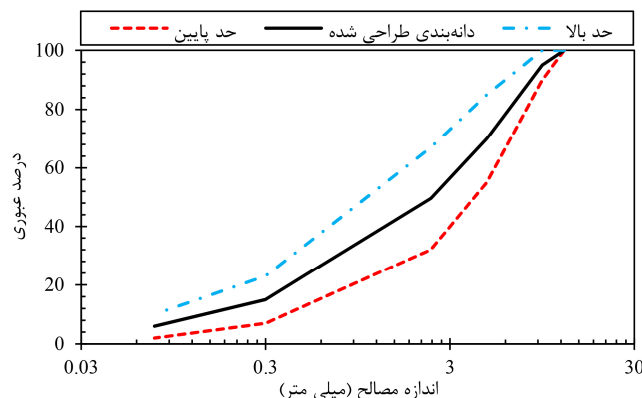
الیاف کورتا مخلوطی از الیاف مصنوعی متشکل از الیاف آرامید و پلی الفین با مقاومت، دوام و خاصیت چسبندگی بالا است. این الیاف با کاهش و به تأخیر انداختن ترک های حرارتی، انعکاسی، خستگی و

شیارشده گی، سبب صرفه اقتصادی از طریق افزایش عمر مخلوط آسفالتی می شوند. الیاف پلی الفین موجود در ترکیب در محدوده دمای اختلاط ذوب می شوند و به همین دلیل، به عنوان اصلاح کننده قیر عمل می کنند.

الیاف آرامید نیز به دلیل مقاومت کششی بالا نقش مسلح می‌کنند [۲۰].  
کننده سه‌بعدی دارند و به افزایش مقاومت مخلوط کمک

جدول ۳- مشخصات مصالح سنگی

اندازه مصالح	استاندارد	وزن مخصوص		درصد جذب آب
		ظاهری	حقیقی	
درشت‌دانه ( $< 2/36$ میلی‌متر)	ASTM C-127	۲/۷۴۲	۲/۶۵۶	۱/۱۶۷
ریزدانه ( $2/36 - 0/075$ میلی‌متر)	ASTM C-128	۲/۷۹	۲/۶۷۹	۱/۹۱۵
فیلر ( $> 0/075$ میلی‌متر)	ASTM D-854	۲/۶۵۹	-	-



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی و حدود مجاز

خالی مخلوط آسفالتی متراکم ( $V.T.M^6$ )، درصد فضای خالی مخلوط مصالح سنگی ( $V.M.A^7$ ) و درصد فضای خالی مخلوط سنگی پر شده با قیر ( $V.F.A^8$ ) محاسبه شد [۳۱-۳۴]. لازم به ذکر است که طرح اختلاط، براساس مخلوط آسفالتی فاقد الیاف داده شده است و درصد قیر بهینه به‌عنوان درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی بدون الیاف و مسلح شده با الیاف مورد استفاده قرار گرفته است.

به‌منظور ساخت نمونه‌های مسلح شده با الیاف کورتا، ابتدا الیاف به مصالح سنگی اضافه و پس از اختلاط، قیر به مصالح اضافه گردید. برای تعیین مدول برجهندگی نمونه‌های ساخته‌شده براساس آزمایش کشش غیرمستقیم از دستگاه بارگذاری UTM-30 استفاده شد. مدول

ازجمله مزایای دیگر الیاف کورتا می‌توان به مقاومت کششی بسیار زیاد، وزن کم، فرسایش‌ناپذیری و مقاومت حرارتی بالا اشاره کرد. ویژگی‌های فیزیکی الیاف کورتا در جدول ۴ آورده شده است.

## ۲-۲- طرح اختلاط

در تحقیق حاضر، ابتدا نمونه‌های آسفالتی با درصد‌های مختلف قیر ۶۰-۷۰ (۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵ و ۷) با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه به روش مارشال تهیه شدند. سپس براساس استانداردهای اشته T166، اشته T245 و اشته T209 به ترتیب وزن مخصوص، استحکام و روانی و حداکثر وزن مخصوص نظری نمونه‌های آسفالتی تعیین گردید و براساس معادلات مندرج در نشریه MS-2 انستیتو آسفالت، درصد فضای

<sup>6</sup>- Void in the Total Mix

<sup>7</sup>- Void in Mineral Aggregate

<sup>8</sup>- Void Filled with Asphalt

برجهندگی مطابق استاندارد ASTM-D4123 در ۵ دمای مختلف ۵-، ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی گراد با مقدار صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم الیاف در هر تن با دو شکل موج بارگذاری نیم سینوسی و مربعی اندازه گیری شد [۳۵]. مقادیر پارامترهای طرح اختلاط به ازای درصد بهینه قیر در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۴- خواص فیزیکی الیاف کورتا

مواد	پلی آلفین	آرامید
شکل	تک رشته ای- دو رشته ای	تک رشته ای
وزن مخصوص	۰/۹۱	۱/۴۴
مقاومت کششی (psi)	۷۰۰۰	۴۰۰۰۰
طول (میلی متر)	۱۹	۱۹
رنگ	سیاه	زرد
مقاومت اسیدی/ بازی	بی اثر	بی اثر

جدول ۵- پارامترهای مخلوط آسفالتی به ازای درصد قیر بهینه

پارامتر	مقدار	محدوده
درصد بهینه قیر	۵/۶	-
درصد فضای خالی	۴/۰	۳-۵
درصد فضای خالی مخلوط مصالح سنگی (V.M.A)	۱۳/۶	حد اقل ۱۳
درصد فضای خالی مخلوط مصالح سنگی پر شده با قیر (V.F.A)	۶۴	۶۰-۷۵
روانی (mm)	۲/۵	۲-۳/۵
وزن مخصوص ( $\text{kg/m}^3$ )	۲۴۵۸	-
استقامت مارشال (kN)	۱۶	حد اقل ۸

## ۳-۲- آزمایش مدول برجهندگی

هر پالس با دو شکل بارگذاری نیم سینوسی و مربعی مورد آزمایش قرار گرفتند.

به منظور حذف اثرات نحوه ساخت و تراکم، هر نمونه باید دو بار تحت آزمایش مدول برجهندگی قرار گیرد. ابتدا در راستای اول، آزمایش انجام شد و سپس نمونه در نوبت دوم به اندازه ۹۰ درجه چرخانده شده و آزمایش مجدداً تکرار شد. مقدار میانگین دو آزمایش به عنوان مقدار مدول برجهندگی گزارش می شود. جهت تعیین مقدار مدول برجهندگی از رابطه (۱) استفاده می شود:

$$M_R = \frac{P \times (v + 0.27)}{t \times \Delta H} \quad (1)$$

که در آن:

$M_R$ : مدول برجهندگی بر حسب مگاپاسکال،

$P$ : بار تکراری بر حسب نیوتن،

$v$ : نسب پواسون،

مدول برجهندگی به عنوان پارامتری مهم در شناسایی عملکرد مصالح روسازی برای تحلیل پاسخ روسازی تحت اثر بارگذاری ترافیکی مطرح می باشد. این پارامتر با اعمال بارگذاری در مد کشش غیرمستقیم و با انجام بارگذاری تکراری تعیین می شود (شکل ۲). در استاندارد ASTM D4121 روش تعیین مدول برجهندگی مخلوط های آسفالتی با این روش بیان شده است [۳۵]. در این تحقیق، جهت تعیین مدول برجهندگی از دستگاه UTM30 براساس استاندارد مذکور استفاده شده است.

نمونه ها در ۵ دمای ۵-، ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی گراد، با زمان بارگذاری ۰/۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۴۵، ۰/۹، ۱/۸، ۴/۵ و ۹ ثانیه در

t: ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر و

$\Delta H$ : تغییر شکل برگشت‌پذیر افقی برحسب میلی‌متر است. مقادیر نسبت پواسون در نظر گرفته‌شده براساس دما در جدول ۶ داده شده است.

جدول ۶- مقادیر ضریب پواسون براساس دما

دما	-۵	۵	۱۵	۲۵	۳۵
نسبت پواسون	۰/۱۸	۰/۲	۰/۲۶	۰/۳۲	۳۸



شکل ۲- تجهیزات مربوط به اندازه‌گیری مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی

### ۳- روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ ( $RSM^9$ ) مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی مفید برای توسعه، بهبود و بهینه‌سازی فرآیندها می‌باشد [۳۰]. روش سطح پاسخ، یک روش مبتنی بر رگرسیون برای برقراری ارتباط بین چندین متغیر ورودی به‌طور بالقوه و یک پارامتر خروجی است. در اصطلاح به این پارامتر خروجی، پاسخ گفته می‌شود. متغیرهای ورودی در اغلب اوقات به‌عنوان متغیرهای مستقل شناخته می‌شوند و در عمل، وابسته به کنترل محققان و مهندسان می‌باشند. روش سطح پاسخ، متشکل از راهبردهای علمی برای کاوش در فضای فرآیند یا متغیرهای مستقل، مدل‌سازی آماری- تجربی به‌منظور توسعه یک رابطه مناسب میان متغیرهای ورودی و خروجی و بهینه‌سازی روش‌ها برای یافتن مقدار متغیرهای

فرآیند که مقادیر مطلوب پاسخ را منجر می‌شود، است.

در این تحقیق، بیشتر بر کاربرد دوم روش سطح پاسخ یعنی مدل‌سازی آماری به‌منظور توسعه یک رابطه تقریب مناسب میان پاسخ  $Y$  و متغیرهای مستقل  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$  تمرکز شده است. رابطه کلی به‌صورت زیر است:

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن شکل تابع پاسخ دقیق  $f$  ناشناخته است و ممکن است پیچیده باشد و  $\varepsilon$  نشان‌دهنده خطای مدل‌سازی است که در تابع  $f$  به‌حساب نیامده است.  $\varepsilon$  معمولاً شامل اثرات خطای اندازه‌گیری بر پاسخ و همچنین تأثیر خطای ناشی از عوامل پارامترهای ورودی ناشناخته در مدل‌سازی است.  $\varepsilon$  همانند یک خطای آماری رفتار کرده که اغلب به جهت داشتن یک توزیع احتمال نرمال با میانگین صفر و واریانس  $\sigma^2$  فرض می‌شود. پس داریم:

$$E(y) = \eta = E[f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)] + E(\varepsilon) = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad (3)$$

متغیرهای طبیعی  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$  در رابطه (۳) معمولاً متغیرهای طبیعی نامیده می‌شوند، زیرا با واحدهای اندازه‌گیری طبیعی مانند درجه سانتی‌گراد یا کیلوگرم بر مترمکعب بیان شده‌اند. در اکثر تحقیقات مبتنی بر مدل سطح پاسخ، به‌راحتی می‌توان متغیرهای طبیعی را به متغیرهای کد شده  $x_1, x_2, \dots, x_k$  که معمولاً به‌صورت بی‌بعد، با میانگین صفر و همان واریانس تعریف می‌شوند، تبدیل نمود. با در نظر گرفتن متغیرهای کد شده، تابع پاسخ رابطه (۳) به‌صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (4)$$

به دلیل ناشناخته بودن شکل تابع پاسخ  $f$ ، باید آن را تقریب زد. در حقیقت، استفاده موفق از سطح پاسخ به توانایی محقق برای توسعه یک تقریب مناسب برای  $f$  بستگی دارد. معمولاً، یک تابع چندجمله‌ای مرتبه پایین در منطقه نسبتاً کوچکی از فضای متغیر مستقل، مناسب است. در بسیاری موارد، از یک مدل چندجمله‌ای مرتبه اول یا مرتبه دوم استفاده می‌شود. مدل‌های مرتبه اول

<sup>9</sup>- Response Surface Methodology

زمانی مناسباند که محقق علاقه‌مند باشد تا سطح پاسخ صحیح را در بیش از یک منطقه نسبتاً کوچک از فضای متغیر مستقل و محلی که در آن انحنای کمی در  $f$  وجود دارد، تخمین بزند.

در صورت وجود دو متغیر مستقل، مدل مرتبه اول با توجه به متغیرهای کد شده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (5)$$

که در این رابطه ضرایب  $\beta_i$  پارامترهای ثابت مدل می‌باشند. شکل مدل مرتبه اول در معادله (۵)، گاهی اوقات تحت عنوان مدل تأثیرات اصلی نامیده می‌شود، زیرا فقط اثرات اصلی دو متغیر فرضی  $x_1$  و  $x_2$  را شامل می‌شود. در صورت وجود یک برهم‌کنش بین این متغیرها، می‌توان آن را به سادگی به مدل افزود:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (6)$$

افزودن جزء برهم‌کنش، معرف انحنای تابع پاسخ خواهد بود. اغلب انحنای در سطح پاسخ صحیح به اندازه‌ای است که مدل مرتبه اول (حتی با وجود جزء برهم‌کنش) برای تقریب آن دارای کارایی لازم نیست. در این شرایط به مدل مرتبه دوم نیاز خواهد بود. در حالت وجود دو متغیر مستقل، مدل مرتبه دوم به صورت زیر می‌باشد:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (7)$$

این مدل می‌تواند به عنوان یک تقریب از سطح پاسخ صحیح در یک منطقه نسبتاً کوچک، مفید واقع شود. دلایل استفاده از مدل مرتبه دوم موارد زیر است:

۱- مدل مرتبه دوم بسیار انعطاف‌پذیر است و می‌تواند طیف گسترده‌ای از توابع را در برگیرد. به همین منظور، اغلب به عنوان یک تقریب سطح پاسخ صحیح، به خوبی عمل خواهد کرد.

۲- محاسبه پارامترهای  $\beta$  به راحتی انجام خواهد پذیرفت و برای این منظور می‌توان از روش حداقل مربعات استفاده نمود.

۳- تجارب عملی نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل

مرتبه دوم در حل مسائل واقعی سطح پاسخ است.

در حالت کلی، می‌توان مدل مرتبه اول را به صورت زیر نوشت:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k \quad (8)$$

و مدل مرتبه دوم نیز به صورت رابطه (۹) خواهد بود:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

در این تحقیق، به منظور ساخت مدل RSM از نسخه ۱۲ نرم‌افزار Design Expert استفاده شده است. این نرم‌افزار امکان برازش، تحلیل و مقایسه توابع مختلف اعم از خطی، برهم‌کنش (2FI) و چندجمله‌ای را فراهم می‌کند. همچنین صحت مدل<sup>۱۰</sup> با استفاده از آزمون فیشر سنجیده شد و دقت عملکرد مدل به وسیله ضریب رگرسیون ( $R^2$ ) مورد ارزیابی قرار گرفت. به علاوه، تأثیر متغیرهای ورودی بر روی مقاومت فشاری با استفاده از تحلیل واریانس ( $ANOVA^{11}$ ) بررسی شد.

#### ۴- پایگاه داده مورد استفاده

به منظور مدل سازی مدول برجهندگی مصالح مسلح شده با الیاف کورتا مجموعاً ۳۰۰ داده مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. در واقع نمونه‌های ساخته شده با سه درصد مختلف قیر (۵/۱، ۵/۶ و ۶/۱ که به ترتیب نیم درصد کمتر از مقدار قیر بهینه، مقدار قیر بهینه و نیم درصد بیشتر از قیر بهینه)، ۴ مقدار مختلف الیاف کورتا (صفر، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم در هر تن آسفالت) در ۵ دمای مختلف (۵-، ۱۵، ۲۵ و ۳۵)، در ۵ نرخ بارگذاری مختلف (۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میلی‌ثانیه) و با دو شکل موج بارگذاری مربعی و نیم‌سینوسی تحت آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم

<sup>10</sup>- Significant of the model

<sup>11</sup>- Analysis of variance

قرار گرفتند. جدول ۷ مشخصات آماری پارامترهای ورودی و خروجی را برای پایگاه داده مورد استفاده نشان می‌دهد. جدول ۷- مشخصات آماری پارامترهای ورودی و خروجی را برای پایگاه داده مورد استفاده.

پارامتر	پارامترهای ورودی				پارامترهای خروجی	
	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان بارگذاری (میلی ثانیه)	درصد قیر (درصد)	درصد لیاف (گرم در تن)	مدول برجهندگی با بارگذاری نیم سینوسی	مربعی
حداکثر	۳۵	۱۰۰۰	۶/۱	۱/۵	۱۶۴۶۸	۱۳۵۱۱/۵
حداقل	-۵	۵۰	۵/۱	صفر	۳۴۰	۲۱۴/۵
میان	۱۵	۲۰۰	۵/۶	۰/۵	۴۵۸۳/۵	۳۱۶۴
میانگین	۱۵	۳۷۰	۵/۶	۰/۷۵	۵۸۲۵/۷۶	۴۲۹۱/۷۶
انحراف معیار	۱۴/۱۷	۳۵۲/۱۶	۰/۴۱	۰/۵۶	۴۵۷۸/۱۱	۳۵۸۶/۶۴

## ۵- ارزیابی مدل ساخته‌شده توسط RSM

تابع درجه دوم برتری بیشتری دارد (جدول ۸). این مدل علاوه بر مقدار کم  $p$  ضریب رگرسیون ۰/۹۷۷ و ۰/۹۷۹ را به ترتیب برای شکل موج بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی نتیجه داد. منظور از درجه آزادی رگرسیون و خطا در هر مدل به ترتیب نشان‌دهنده تعداد متغیرهای پذیرفته شده و کنار گذاشته شده به دلیل تأثیر کم آن‌ها در فرآیند پیش‌بینی از مدل کلی ساخته شده است.

در این تحقیق از سه تابع خطی، برهم‌کنش و درجه دوم به منظور توسعه مدل سطح پاسخ جهت پیش‌بینی مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی مسلح شده با لیاف کورتا استفاده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو شکل موج بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی،

جدول ۸- مقایسه مدل‌های ساخته‌شده برای پیش‌بینی مدول برجهندگی

شکل موج	مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Prob>F	R <sup>2</sup>
نیم سینوسی	خطی	۶۰/۳۸	۴	۱۵/۱۰	۱۱۳۱/۳۴	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۳۸۸
	برهم‌کنش (2FI)	۶۱/۰۹	۱۰	۶/۱۱	۵۴۷/۰۶	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۴۹۸
	درجه دوم	۶۳	۱۴	۴/۵	۹۷۱/۶۱	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۷۹۵
مربعی	خطی	۶۷/۰۶	۴	۱۶/۷۷	۱۲۲۵/۴۵	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۴۳۲
	برهم‌کنش (2FI)	۶۸/۰۶	۱۰	۶/۸۱	۶۴۶/۴۵	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۵۷۲
	درجه دوم	۶۹/۵۱	۱۴	۴/۹۶	۸۹۰/۵۲	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۷۷۷

می‌تواند در پیش‌بینی مدول برجهندگی تأثیرگذار باشد. علت انتخاب این متغیرها، مقادیر کمتر از ۰/۰۵ برای پارامتر  $\text{Prob}>F$  است. همچنین با توجه به مقادیر  $F$ ، درجه اهمیت هریک از متغیرها به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) قابل بیان است. در این روابط،  $T$  دما،  $LT$  زمان بارگذاری،  $BC$  درصد قیر و  $KF$  درصد لیاف می‌باشد.

براساس جدول ۹، تحلیل واریانس نشان می‌دهد که علاوه بر تمامی متغیرهای اولیه، برهم‌کنش میان دما با زمان بارگذاری، درصد قیر و درصد لیاف، برهم‌کنش میان زمان بارگذاری با درصد قیر و درصد لیاف، برهم‌کنش میان درصد قیر و درصد لیاف، مجذور دما، مجذور زمان بارگذاری، مجذور درصد قیر و مجذور درصد لیاف نیز

(الف) پیش‌بینی مدول برجهندگی براساس شکل موج بارگذاری نیم‌سینوسی:

$$T > LT > T^2 > "T \times LT" > LT^2 > "T \times BC" > KF^2 > BC > "BC \times KF" > KF > "T \times KF" > "LT \times KF" > BC^2 > "LT \times BC" \quad (10)$$

(ب) پیش‌بینی مدول برجهندگی براساس شکل موج بارگذاری مربعی:

$$T > LT > T^2 > "T \times LT" > LT^2 > KF^2 > "BC \times KF" > BC > "T \times BC" > BC^2 > "T \times KF" > KF > "LT \times BC" > "LT \times KF" \quad (11)$$

جدول ۹- تحلیل واریانس

متغیر	نماد	مجموع مربعات	F	Prob>F	مجموع مربعات	F	Prob>F
شکل موج بارگذاری مربعی		شکل موج بارگذاری نیم سینوسی		شکل موج بارگذاری مربعی		شکل موج بارگذاری نیم سینوسی	
دما	T	۵۱/۶۳	۱۱۱۴۷/۷۲	<۰/۰۰۰۱	۵۷/۹۴	۱۰۳۹۲/۶۶	<۰/۰۰۰۱
زمان بارگذاری	LT	۳/۸۱	۸۲۱/۸۸	<۰/۰۰۰۱	۴/۴۳	۷۹۴/۴۱	<۰/۰۰۰۱
درصد قیر	BC	۰/۰۵۷۸	۱۲/۴۸	۰/۰۰۰۵	۰/۰۶۸۱	۱۲/۲۱	۰/۰۰۰۶
درصد الیاف	KF	۰/۰۲۴۸	۵/۳۶	۰/۰۲۱۳	۰/۰۰۴۴	۰/۷۸۸۹	۰/۳۷۵۲
برهم‌کنش دما و زمان بارگذاری	T×LT	۰/۵۷۳۳	۱۲۳/۸	<۰/۰۰۰۱	۰/۸۴۸۸	۱۵۲/۲۴	<۰/۰۰۰۱
برهم‌کنش دما و درصد قیر	T×BC	۰/۰۷۴۱	۱۵/۹۹	<۰/۰۰۰۱	۰/۰۳۸۵	۶/۹	۰/۰۰۹۱
برهم‌کنش دما و درصد الیاف	T×KF	۰/۰۰۳۱	۰/۶۶۷	۰/۴۱۴۸	۰/۰۱	۱/۸	۰/۱۸۱۱
برهم‌کنش زمان بارگذاری و درصد قیر	LT×BC	۰/۰۰۱۲	۰/۲۵۳	۰/۶۱۵۴	۰/۰۰۹۹	۰/۱۷۰۴	۰/۶۸۰۱
برهم‌کنش زمان بارگذاری و درصد الیاف	LT×KF	۰/۰۰۲۳	۰/۵۰۳۳	۰/۴۷۸۶	۰/۰۰	۰/۰۰۶۲	۰/۹۳۷۱
برهم‌کنش درصد قیر و درصد الیاف	BC×KF	۰/۰۵۴۹	۱۱/۸۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۹۵۲	۱۷/۰۷	<۰/۰۰۰۱
مجذور دما	T <sup>2</sup>	۱/۳۸	۲۹۷/۵۴	<۰/۰۰۰۱	۰/۸۸۷	۱۵۹/۱	<۰/۰۰۰۱
مجذور زمان بارگذاری	LT <sup>2</sup>	۰/۴۶۲۹	۹۹/۹۴	<۰/۰۰۰۱	۰/۴۲۵۶	۷۶/۳۳	<۰/۰۰۰۱
مجذور درصد قیر	BC <sup>2</sup>	۰/۰۰۱۳	۰/۲۶۹۹	۰/۶۰۳۸	۰/۰۲۴۱	۴/۳۳	۰/۰۳۸۳
مجذور درصد الیاف	KF <sup>2</sup>	۰/۰۶۵۳	۱۴/۰۹	۰/۰۰۰۲	۰/۱۱۶۷	۲۰/۹۳	<۰/۰۰۰۱

نشان‌دهنده میزان اثرگذاری آن‌ها بر مدول برجهندگی است. جدول ۱۰ تحلیل آماری مدل RSM را نشان می‌دهد.

مدل ساخته‌شده توسط روش سطح پاسخ برای اندازه‌گیری مدول برجهندگی برای دو شکل موج بارگذاری نیم سینوسی و مربعی به ترتیب در روابط (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. ضرایب هریک از متغیرها

$$\log(Mr) = 4.35181 - 0.00036 \cdot T - 0.00058 \cdot LT - 0.13866 \cdot BC + 0.43958 \cdot KF - 8.79258 \times 10^{-6} \cdot T \times LT - 0.00272 \cdot T \times BC + 0.0004 \cdot T \times KF - 0.000014 \cdot LT \times BC - 0.000014 \cdot LT \times KF - 0.059276 \cdot BC \times KF - 0.0004 \cdot T^2 + 4.59025 \times 10^{-7} \cdot LT^2 + 0.01372 \cdot BC^2 - 0.05899 \cdot KF^2 \quad (12)$$

$$\log(Mr) = 6.07346 - 0.00816T - 0.00058TL - 0.79849BC + 0.55102KF - 0.00001T \times TL - \\ 0.00196T \times BC + 0.00073T \times KF - 0.00001TL \times BC + 1.73381 \times 10^{-6}TL \times KF - 0.07805BC \times KF \quad (13) \\ - 0.00033T^2 + 4.40151 \times 10^{-7}TL^2 + 0.07613BC^2 - 0.07889KF^2$$

جدول ۱۰- تحلیل آماری مدل RSM

پارامترها	شکل موج بارگذاری نیم‌سینوسی	شکل موج بارگذاری مربعی
$R^2$	۰/۹۷۹۵	۰/۹۷۷۷
$R^2$ تعدیل شده (Adj R-Squared)	۰/۹۷۸۵	۰/۹۷۶۶
$R^2$ پیش‌بینی شده (Pred R-Squared)	۰/۹۷۷۲	۹۷۵۱
کفایت دقت (Adeq precision)	۱۱۰/۹۵۲۷	۱۰۷/۵۲۵۲
انحراف معیار	۰/۰۶۸۱	۰/۰۷۴۷
ضریب تغییر (C.V. %)	۱/۹۱	۲/۱۹

که  $M$  تعداد کل داده‌ها در هر مجموعه،  $h_i$  مقدار اندازه‌گیری شده تأمین مدول برجهندگی،  $t_i$  مقدار پیش‌بینی شده تأمین مدول برجهندگی،  $\bar{h}_i$  میانگین  $h_i$  و  $\bar{t}_i$  میانگین  $t_i$  است. مقادیر این پارامترها در جدول (۱۱) داده شده است. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط روش سطح پاسخ با مقادیر اندازه‌گیری شده برای دو شکل موج بارگذاری نیم‌سینوسی و مربعی در شکل ۳ نشان داده شده است. مقادیر بالای  $R^2$  نشان‌دهنده دقت بالای مدل ارائه شده برای پیش‌بینی مدول برجهندگی است.

#### ۶- تحلیل حساسیت

ازجمله مزیت‌های روش سطح پاسخ (RSM)، بررسی تأثیرات برهم‌کنش متغیرهای ورودی مختلف بر میزان خروجی مدل است. در این تحقیق، مدل نهایی به‌دست آمده شامل برهم‌کنش میان دما با زمان بارگذاری، درصد قیر و درصد الیاف، برهم‌کنش میان زمان بارگذاری با درصد قیر و درصد الیاف و همچنین برهم‌کنش میان درصد قیر و درصد الیاف است.

شکل‌های ۴ و ۵ (الف)، تأثیر زمان بارگذاری و دما را بر مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی به ترتیب تحت بار نیم‌سینوسی و مربعی نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش زمان بارگذاری و دما، مقدار مدول

برای محاسبه دقت و عملکرد روش سطح پاسخ از روابط آماری زیر استفاده شد که مقادیر کمتر خطای جذر میانگین مربعات ( $RMSE^{12}$ )، متوسط انحراف مطلق ( $MAD^{13}$ ) و متوسط درصد خطای مطلق ( $MAPE^{14}$ ) نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل توسعه داده شده خواهند بود. در واقع برای یک مدل پیش‌بینی دقیق و بدون هیچ‌گونه خطا می‌توان مقدار یک را برای  $R^2$  و مقدار صفر را برای  $RMSE$ ،  $MAD$  و  $MAPE$  انتظار داشت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (h_i - t_i)^2} \quad (14)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^M (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i) \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^M (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^M (t_i - \bar{t}_i)^2 \right]} \quad (15)$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^M |h_i - t_i|}{M} \quad (16)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^M |h_i - t_i|}{\sum_{i=1}^M h_i} \times 100 \quad (17)$$

<sup>12</sup>- Root-mean-square error

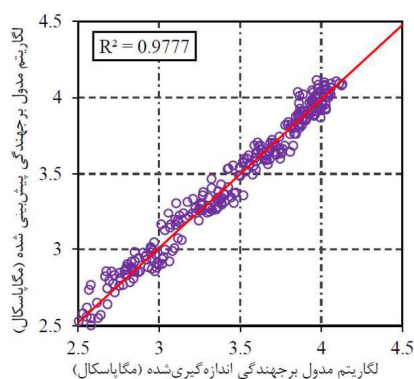
<sup>13</sup>- Mean Absolute Deviation

<sup>14</sup>- Mean absolute percentage error

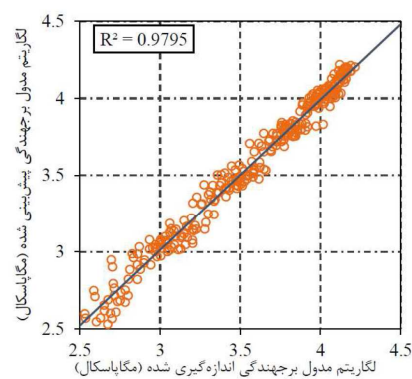
برجهندگی مخلوط های آسفالتی کاهش می یابد.

جدول ۱۱- دقت مدل RSM

مدل	$R^2$	RMSE	MAD	MAPE
بارگذاری نیم سینوسی	۰/۹۷۹۵	۰/۰۶۶۳۳	۰/۴۲۳۴۶	۰/۰۱۴۶۶
بارگذاری مربعی	۰/۹۷۷۷	۰/۰۷۲۷۸	۰/۴۳۶۷۲	۰/۰۱۷۲۶



(ب)



(الف)

شکل ۳- مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده توسط RSM برای شکل موج بارگذاری (الف) نیم سینوسی و (ب) مربعی

برجهندگی با افزایش درصد قیر، تقریباً مستقل از زمان بارگذاری است. در شکل های ۴ و ۵ (ه) و (و) ملاحظه می شود که افزایش درصد الیاف تا مقدار مشخصی باعث افزایش مدول برجهندگی می شود و پس از آن با افزایش درصد الیاف، مقدار مدول برجهندگی کاهش می یابد. درصد بهینه الیاف، تابعی از درصد قیر در مخلوط آسفالتی است. به گونه ای که در مخلوط های آسفالتی با درصد قیر بیشتر، درصد الیاف بهینه کمتر (حدود ۱ کیلوگرم در هر تن) و در مخلوط های با درصد قیر کمتر، درصد قیر بهینه بیشتر (حدود ۱/۵ کیلوگرم در هر تن) است.

## ۷- نتیجه گیری

نتایج این تحقیق به شرح زیر قابل بیان است:  
۱- در این تحقیق از سه تابع درجه دوم، خطی و برهم کنش به منظور پیش بینی مدول برجهندگی مصالح آسفالتی مسلح شده با الیاف کورتا با دو شکل موج بارگذاری نیم سینوسی و مربعی استفاده شد که دقت مدل مبتنی بر تابع درجه دوم نسبت به سایر مدل ها در هر دو شکل موج

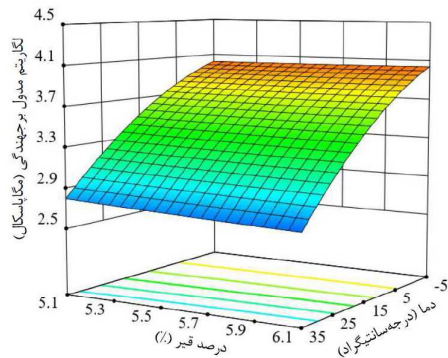
همچنین ملاحظه می شود که تأثیر افزایش زمان بارگذاری بر کاهش مدول برجهندگی در دماهای بالا مشهودتر است. علت این امر را می توان به این صورت تشریح کرد که در دماهای پایین، رفتار مخلوط های آسفالتی به رفتار الاستیک خطی نزدیک می شود و همین موضوع سبب می شود تا زمان بارگذاری تأثیر چندانی بر روی مدول برجهندگی و پاسخ های تنش- کرنش مخلوط های آسفالتی نداشته باشد. همچنین ملاحظه می شود که مقدار مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری مربعی کمتر از مقدار مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری نیم سینوسی است. این نتایج با نتایج به دست آمده از سایر تحقیقات سازگاری دارد.

شکل های ۴ و ۵ (ب) و (ج) نشان می دهند که تأثیر درصد قیر و درصد الیاف بر روی مدول برجهندگی در مقایسه با تأثیر دما بر روی مدول برجهندگی قابل صرف نظر کردن است.

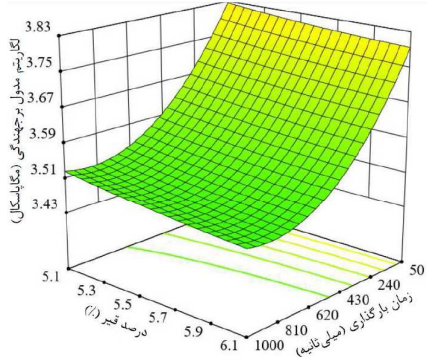
شکل های ۴ و ۵ (د) نشان می دهند که افزایش درصد قیر باعث کاهش مدول برجهندگی می شود. همچنین ملاحظه می شود که نرخ کاهش مدول

بارگذاری بیشتر شد. این مدل علاوه بر مقدار  $P$  کم  
( $0.001 < 0$ ) ضریب رگرسیونی به ترتیب برابر

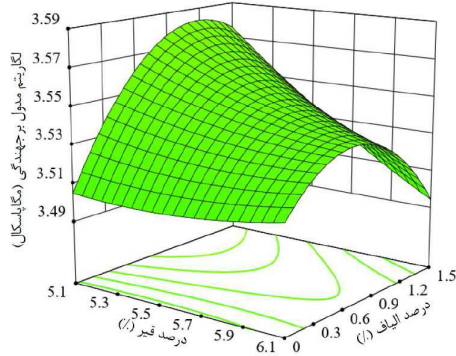
۰/۹۷۹۵ و ۰/۹۷۷۷ به دست آورد.



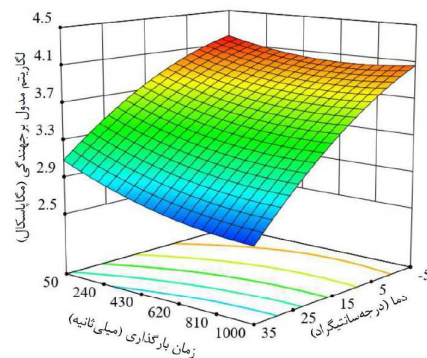
(ب) - برهم‌کنش دما و درصد قیر بر مدول برجهندگی



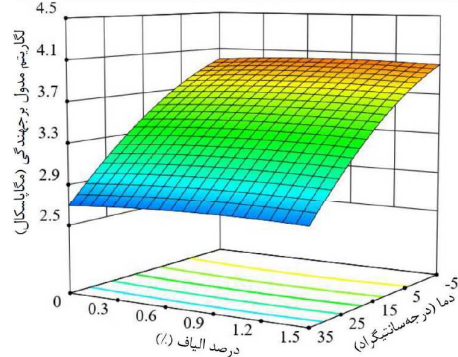
(د) - برهم‌کنش زمان بارگذاری و درصد قیر بر مدول برجهندگی



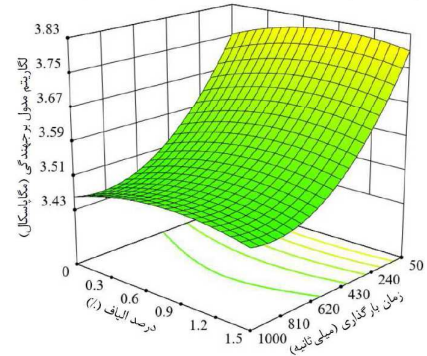
(و) - برهم‌کنش درصد قیر و درصد الیاف بر مدول برجهندگی



(الف) - برهم‌کنش دما و زمان بارگذاری بر مدول برجهندگی



(ج) - برهم‌کنش دما و درصد الیاف بر مدول برجهندگی



(ه) - برهم‌کنش زمان بارگذاری و درصد الیاف بر مدول برجهندگی

شکل ۴- برهم‌کنش پارامترهای ورودی بر مدول برجهندگی به دست آمده براساس شکل موج نیم‌سینوسی

مجذور درصد الیاف نیز می‌تواند در پیش‌بینی مدول  
برجهندگی تأثیرگذار باشد و درجه اهمیت متغیرها  
به صورت زیر است:

(الف) براساس شکل موج بارگذاری نیم‌سینوسی:

$$T > LT > T^2 > "T \times LT" > LT^2 > "T \times BC" > \\ KF^2 > BC > "BC \times KF" > KF > "T \times KF" > \\ "LT \times KF" > BC^2 > "LT \times BC"$$

۲- مدل به دست آمده نشان داد که علاوه بر تمامی  
متغیرهای اولیه، برهم‌کنش میان دما با زمان  
بارگذاری، درصد قیر و درصد الیاف، برهم‌کنش  
میان زمان بارگذاری با درصد قیر و درصد الیاف،  
برهم‌کنش میان درصد قیر و درصد الیاف، مجذور  
دما، مجذور زمان بارگذاری، مجذور درصد قیر و

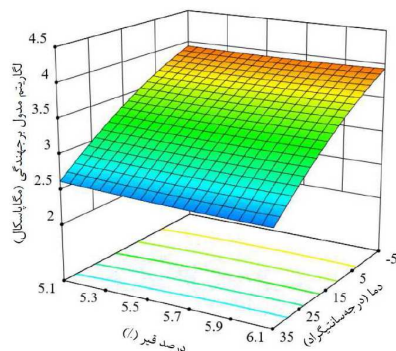
(ب) براساس شکل موج بارگذاری مربعی:

$$T > LT > T^2 > "T \times LT" > LT^2 > KF^2 >$$

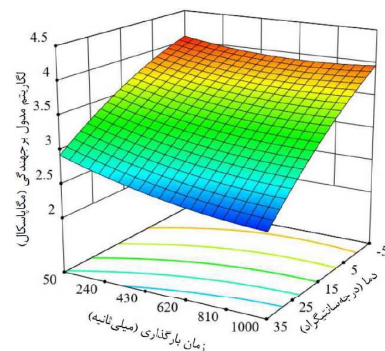
$$"BC \times KF" > BC > "T \times BC" > BC^2 >$$

$$"T \times KF" > KF > "LT \times BC" > "LT \times KF"$$

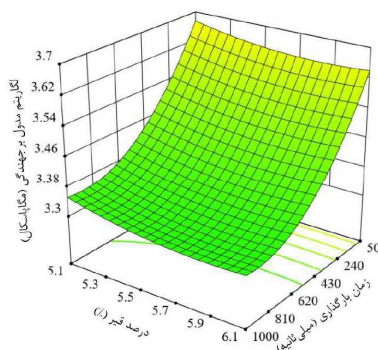
که T دمای بارگذاری، LT زمان بارگذاری، BC



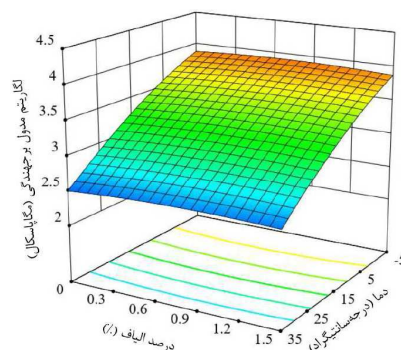
(ب) - برهم کنش دما و درصد قیر بر مدول برجهندگی



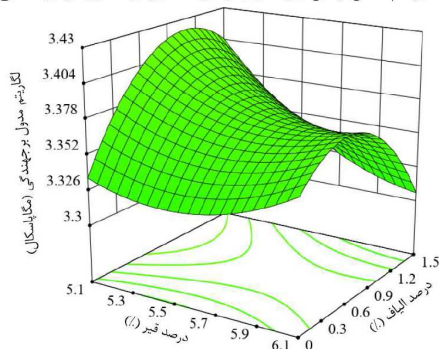
(الف) - برهم کنش دما و زمان بارگذاری بر مدول برجهندگی



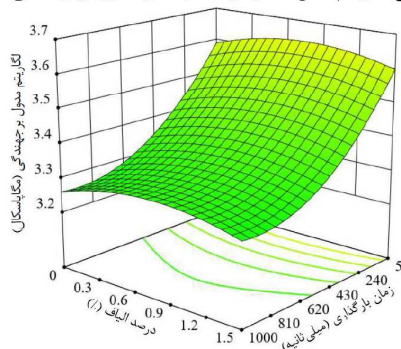
(د) - برهم کنش زمان بارگذاری و درصد قیر بر مدول برجهندگی.



(ج) - برهم کنش دما و درصد الیاف بر مدول برجهندگی.



(و) - برهم کنش درصد قیر و درصد الیاف بر مدول برجهندگی.



(ه) - برهم کنش زمان بارگذاری و درصد الیاف بر مدول برجهندگی.

شکل ۵- برهم کنش پارامترهای ورودی بر مدول برجهندگی به دست آمده براساس شکل موج مربعی

سینوسی ۰/۹۷۸۵ و برای بارگذاری مربعی ۰/۹۷۶۶) با توجه به تفاوت کمتر از ۰/۰۰۱ میان آن‌ها بود.

۴- با افزایش زمان بارگذاری، مقدار مدول برجهندگی

۳- مقدار  $R^2$  پیش‌بینی شده (برای بارگذاری نیم

سینوسی ۰/۹۷۹۵ و برای بارگذاری مربعی

۰/۹۷۷۷) نشان‌دهنده سازگاری منطقی آن با

مقدار  $R^2$  تعدیل یافته (برای بارگذاری نیم

می‌یابد و نمودار آن حالت خطی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیری رویه آسفالتی با افزایش درصد قیر به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد.

۶- افزایش درصد الیاف تا مقدار مشخصی باعث افزایش مدول برجهندگی می‌شود و سپس با افزایش درصد الیاف از مقدار بهینه مدول برجهندگی کاهش می‌یابد. با توجه به اشکال، مقدار بهینه در حدود ۰/۹ می‌باشد.

مخلوط‌های آسفالتی کاهش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود که مقدار مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری مربعی کمتر از مقدار مدول برجهندگی تحت اثر بارگذاری نیم سینوسی است. با افزایش دما نیز مدول برجهندگی کم می‌شود و شیب آن در مقایسه با افزایش زمان بارگذاری بیشتر است.

۵- با افزایش دما، زمان بارگذاری یا الیاف مدول برجهندگی در اثر افزایش درصد قیر کاهش

## منابع

- [1] Fang, X.-Q., Tian, J.-Y., Yang, S.-P., & Li, B.-L. (2019). "Elastic-slip interface effect on effective elastic modulus of elliptical-fiber reinforced asphalt concrete with large deformation". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19(3), 707-715.
- [2] Alsaif, A., Bernal, S. A., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2018). "Durability of steel fibre reinforced rubberised concrete exposed to chlorides". *Construction and Building Materials*, 188, 130-142.
- [3] Alsaif, A., Koutas, L., Bernal, S. A., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2018). "Mechanical performance of steel fibre reinforced rubberised concrete for flexible concrete pavements". *Construction and Building Materials*, 172, 533-543.
- [4] Dalhat, M., Osman, S., Alhuraish, A.-A. A., Almarshad, F. K., Qarwan, S. A., & Adesina, A. Y. (2020). "Chicken Feather fiber modified hot mix asphalt concrete: Rutting performance, durability, mechanical and volumetric properties". *Construction and Building Materials*, 239, 117849.
- [5] Luo, D., Khater, A., Yue, Y., Abdelsalam, M., Zhang, Z., Li, Y., & Iseley, D. T. (2019). "The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: A review". *Construction and Building Materials*, 209, 377-387.
- [6] Bocci, E., & Prosperi, E. (2020). "Recycling of reclaimed fibers from end-of-life tires in hot mix asphalt". *Journal of Traffic and Transportation Engineering, (English Edition)*.
- [7] Abiola, O., Kupolati, W., Sadiku, E., & Ndambuki, J. (2014). "Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review". *Construction and Building Materials*, 54, 305-312.
- [8] Da Silva, L., Benta, A., & Picado-Santos, L. (2018). "Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking". *Construction and Building Materials*, 160, 539-550.
- [9] Li, Z., Zhang, X., Fa, C., Zhang, Y., Xiong, J., & Chen, H. (2020). "Investigation on characteristics and properties of bagasse fibers: Performances of asphalt mixtures with bagasse fibers". *Construction and Building Materials*, 248, 118648.
- [10] Qin, X., Shen, A., Guo, Y., Li, Z., & Lv, Z. (2018). "Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers". *Construction and Building Materials*, 159, 508-516.
- [11] Slebi-Acevedo, C. J., Lastra-González, P., Castro-Fresno, D., & Bueno, M. (2020). "An experimental laboratory study of fiber-reinforced asphalt mortars with polyolefin-aramid and polyacrylonitrile fibers". *Construction and Building Materials*, 248, 118622.
- [12] Tanzadeh, J., & Shahrezagamasaei, R. (2017). "Laboratory assessment of hybrid fiber and nano-silica on reinforced porous asphalt mixtures". *Construction and Building Materials*, 144, 260-270.
- [13] Ziari, H., & Moniri, A. (2019). "Laboratory evaluation of the effect of synthetic Polyolefin-glass fibers on performance properties of hot mix asphalt". *Construction and Building Materials*, 213, 459-468.
- [14] Cleven, M.A., (2000). *Investigation of the properties of carbon fiber modified asphalt mixtures*, (Master's thesis, Michigan Technological University).
- [15] Wu, S., Ye, Q., & Li, N. (2008), "Investigation of rheological and fatigue properties of asphalt mixtures containing polyester fibers". *Construction and Building Materials*, 22(10), 2111-2115.
- [16] Tapkin, S. (2008), "The effect of polypropylene fibers on asphalt performance". *Building and Environment*, 43(6), 1065-1071.

- [17] Taherkhani, H., & Amini, H. (2016), "Investigating the Properties of Nylon Fiber Reinforced Asphalt Concrete". *International Journal of Science and Engineering Investigations*, 5(48). 1-6.
- [18] Putman, B.J. (2011), "Effects of fiber finish on the performance of asphalt binders and mastics". *Advances in Civil Engineering*, 2011.
- [19] Noorvand, H., Salim, R., Medina, J., Stempihar, J., & Underwood, B.S. (2018), "Effect of synthetic fiber state on mechanical performance of fiber reinforced asphalt concrete". *Transportation Research Record*, 2672(28), 42-51.
- [20] Kaloush, K. E., Biligiri, K. P., Zeiada, W. A., Rodezno, M. C., & Reed, J. X. (2010). "Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced material characterization tests". *Journal of Testing and Evaluation*. 38(4), 400-411.
- [21] Fazaali, H., Yousef, S., Pirnoun, A., & Dabiri, A. (2016). "Laboratory and field evaluation of the warm fiber reinforced high performance asphalt mixtures (case study Karaj-Chaloos Road)". *Construction and Building Materials*, 122, 273-283.
- [22] Mirabdolazimi, S., & Shafabakhsh, G. (2017), "Rutting depth prediction of hot mix asphalts modified with forta fiber using artificial neural networks and genetic programming technique". *Construction and Building Materials*, 148, 666-674.
- [23] Jaskuła, P., Stienss, M., & Szydlowski, C. (2017), "Effect of polymer fibres reinforcement on selected properties of asphalt mixtures". *Procedia Engineering*, 172, 441-448.
- [24] Underwood, B.S., & Zeiada, W. (2015), Layer Coefficient Calibration of Fiber Reinforced Asphalt Concrete Based On Mechanistic Empirical Pavement Design Guide.
- [25] Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. A., Yoo, P. J., Dessouky, S. H., Gibson, N., Harman, T., ... & Petros, K. (2008). "Accuracy of current complex modulus selection procedure from vehicular load pulse: NCHRP Project 1-37A mechanistic-empirical pavement design guide". *Transportation research record*, 2087(1), 81-90.
- [26] Fujie Zhou, E. F., & Scullion, T. (2010). *Development, calibration, and validation of performance prediction models for the texas ME flexible pavement design system*. Report No. FHWA/TX-10/0-5798-2, Texas Department of Transportation, Research and Technology Implementation Office, PO Box 5080, Austin, Texas.
- [27] AASHTO. (1996). *Standard test method for determining the resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension*, AASHTO designation: TP 31, Washington DC, United States: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [28] ASTM. (2011). *Standard test method for determining the resilient modulus of bituminous mixtures by indirect tension test*, ASTM designation: D 7369. Washington, DC, USA: ASTM International.
- [29] Hu, X., Zhou, F., Hu, S., & Walubita, L.F. (2010). "Proposed loading waveforms and loading time equations for mechanistic-empirical pavement design and analysis". *Journal of Transportation Engineering*, 136(6), 518-27.
- [30] Myers, R.H., & Montgomery, D.C. (2002). "Response Surface Methodology: process and product optimization using designed experiment". *A Wiley-Interscience Publication*.
- [31] AASHTO. (2010). *AASHTO T166: Bulk specific gravity of compacted bituminous mixtures using saturated surface-dry specimens*. Transportation Research Board, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [32] AASHTO. (2010). *AASHTO T245: Standard method of test for resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus*. Transportation Research Board, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [33] AASHTO. (2010). *AASHTO T209: Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)*. Transportation Research Board, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [34] Asphalt Institute. (1997). *Mix design methods, MS-2*. The Asphalt Institute manual series no. 2.
- [35] ASTM International. (1995). *ASTM D 4123: Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.